

# No eļļas lampas līdz gaismas diodēm



Foto: Dreamstime

Ugunij bija izšķiroša loma *homo sapiens* attīstībā no alu iemītnieka līdz kosmosa iekarotājam: tā sekmēja cilvēka evolūciju, dodot iespēju baudīt gan siltu ēdienu, gan apkurinātu un gaišu mājokli! Taču līdz pat 19. gadsimta beigām vienīgais cilvēkam pieejamais mākslīgās gaismas avots bija atvērta liesma – eļļas lampa, svece, gāzes lampa utt. Eļļas lampa bija svarīgs akmeņi laikmeta izgudrojums, kuru izmantoja senie gleznotāji (1. tab.) [1]. Līdz Edisona kvēlspuldzei Eiropas galvaspilsētās un rūpnīcās izmantoja gāzu lampas. 21. gadsimtā, gluži nemanāmi, ikdienas apgaismē ievieš pusvadītāju diodes (angļu. val. *light emitting diodes* – LED) – efektīvi un ekonomiski gaismas avoti, kuru darbības pamatā ir kvantu fizikas likumi.

Kurts Švarcs

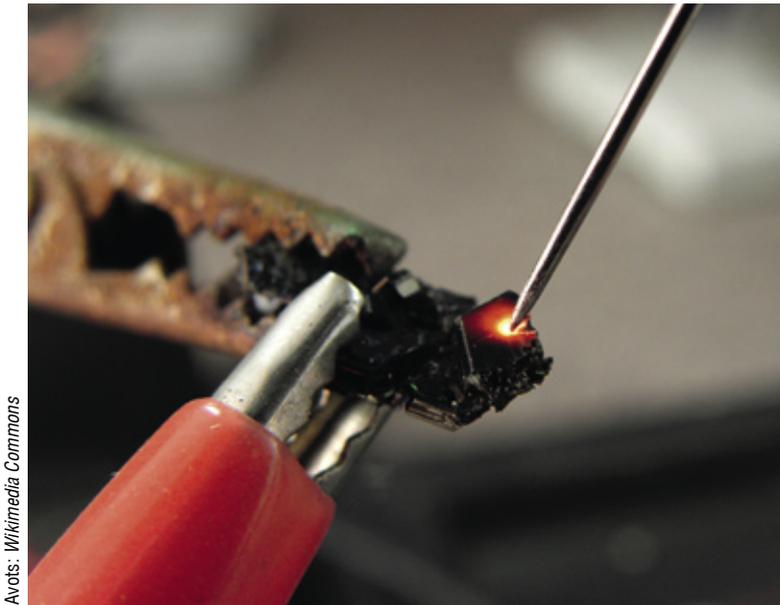
## No kvēlspuldzes līdz pusvadītāju diodēm

Kad 1879. gadā **Tomass Edisons** izgudroja pirmo tehniski stabilo elektrisko kvēlspuldzi ar oglekļa kvēldiegu, elektrotehnika bija tikko sākusī attīstīties un elektriskā kvēlspuldze izmaksāja desmitiem reižu dārgāk nekā sveču vai gāzes lampu apgaismojums. Ģeniālais izgudrotājs, kurš savā radošajā mūžā saņēmis vairāk nekā tūkstoš patentus, tolaik sacīja šādus pravietiskus vārdus: “Mēs padarīsim elektroenerģiju tik lētu, ka tikai bagātie dedzinās sveces” [2]. Šis paredzējums piepildījās jau Edisona dzīves laikā! Jaunā izgudrojuma – kvēlspuldzes svarīgākie elementi bija kvēldiega materiāls (sākumā oglekļa kvēldiegs, vēlāk volframa) un vakuums kvēlspuldzes balonā.

Elektroluminiscenci 1907. gadā atklāja angļu fiziķis un radioinženieris **Henrijs Džozefs Raunds** (*Henry Joseph Round*, 1881 – 1966), kurš bija viens no Markoni centra (ASV) direktoriem un radiatoraidījumu un radiotehnikas pionieriem [3, 4]. Eksperimentējot ar silīcija

1. tabula. Gaismas avotu vēsture

Gads	Gaismas avots/ autors
15 000 gadi pr. Kr.	Sarkanā smilšakmens eļļas lampa, atrasta Lasko alā Francijā līdzās akmeņi laikmeta gleznojumiem
1783	Eļļas lampa ar kokvilnas dakti, Fransuā Argāns ( <i>François Pierre Ami Argand</i> , 1750 – 1803)
1785	Pirmā tehniskā gāzes lampa, Jans Pīters Minkelers ( <i>Jan Pieter Minckeleer</i> , 1748 – 1824)
1879	Elektriskā kvēlspuldze ar oglekļa šķiedrām, Tomass A. Edisons (1847 – 1831)
1906	Volframa elektriskā kvēlspuldze
1938	Luminiscences lampa
1962	Sarkanā gaismas diode (LED)
1993	<i>Nichia</i> (Japāna) pirmās LED ar zilu emisiju
2008	<i>Ushido Lighting</i> (Japāna) LED šķiedras lampa



Avots: Wikimedia Commons

1. attēls. Elektroluminiscence silīcija karbīda kristālā (SiC) zem 10 voltu elektriskā sprieguma. Šo efektu 1907. gadā atklāja un aprakstīja angļu fiziķis un radioinženieris Henrijs Raunds, un tas nosaukts viņa vārdā [3, 4]

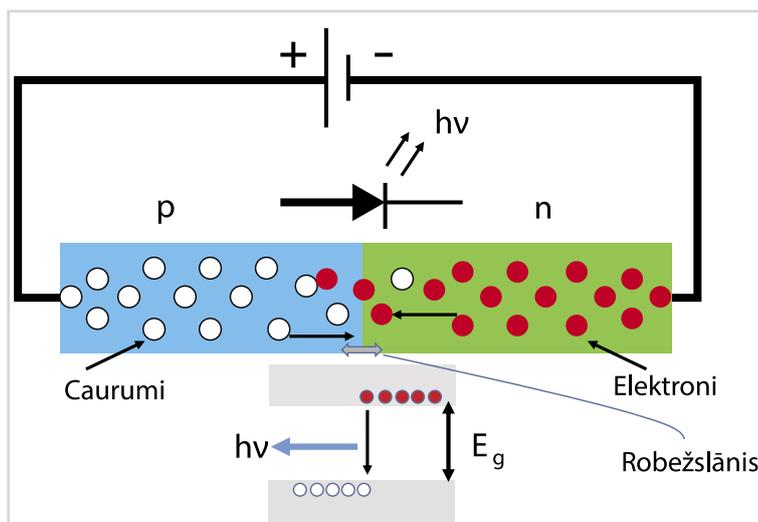


2. attēls. Oļegs Losevs ap 1940. gadu

karbīda (SiC) un citiem kristāliem ar punktveida elektrodu zem 10 voltu līdzsprieguma, Raunds atklāja, ka neorganiskās vielas izstaro gaismu tiešā elektriskā laukā (1. att.). Viņš pareizi novērtēja spīdēšanu kā luminiscenci, nosaucot to par “auksto gaismu”. Ši unikālā atklājuma aprakstu viņš publicēja žurnālā *Electrical World* [3], un šodien tas saucas autora vārdā – Raunda efekts.

Pēc diviem gadu desmitiem talantīgais krievu zinātnieks **Oļegs Losevs** (Олег Владимирович Лосев, 1903 – 1942), nezinot šo publikāciju [3], Raunda efektu SiC kristālos atklāja no jauna. Losevs SiC kristālos izveidoja pirmo gaismas diodi un pētījuma rezultātus publicēja vietējos un starptautiskos žurnālos [4, 5]. Savu gaismas diodes atklājumu viņš 1929. gadā raksturoja ar vārdiem: “Izgdrojums balstās uz silīcija karbīda (SiC) luminiscenci elektriskā laukā, un to var izmantot optisko sakaru tehnikā, telegrāfa un telefona sakaros, attēlu pārraidei u.c.” Losevs saprata šī atklājuma perspektīvas. Tomēr pagājušā gadsimta divdesmitos gados to neizdevās ieviest praksē, un pats Losevs 1942. gadā traģiski gāja bojā Ļeņingradas blokādē [5].

Pusvadītāju gaismas diodes (LED) savu uzvaras ceļu uzsāka tikai pēc Otrā pasaules kara, kad kvantu mehānikas priekšstati ieviesās cietvielu fizikā, tika atklāts tranzistors un pusvadītāji izraisīja apvērsumu visās dzīves jomās.

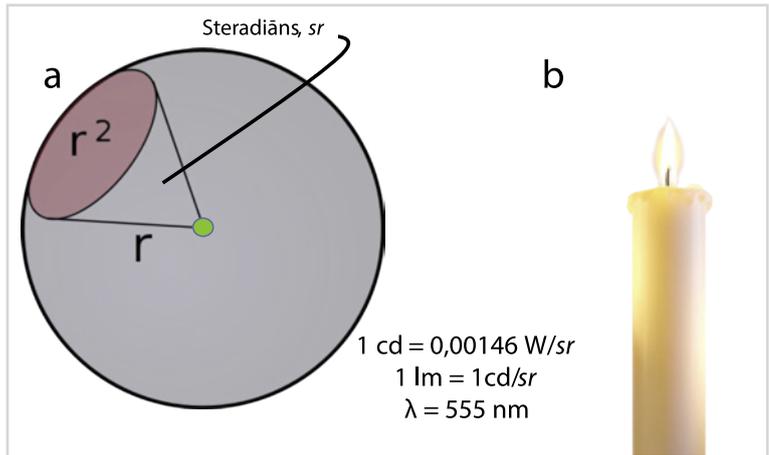


3. attēls. Gaismas diode (LED) sastāv no diviem pusvadītājiem ar elektronu (n) un caurumu (p) vadītspēju. Starp p-tipa un n-tipa pusvadītājiem veidojas robežslānis (platums – daži simti nanometri), kurā pie dažu volta līdzsprieguma notiek elektronu un caurumu rekombinācija ar gaismas kvanta  $h\nu$  emisiju, ko nosaka pusvadītāja aizliegtās zonas enerģija (angļu val. *gap*)  $E_g$ . Atkarībā no pusvadītāja materiāla  $E_g$  mainās robežās no 3,5 līdz 1,5 eV, kas atbilst izstarotam gaismas viļņu garumam ( $\lambda$ ) no 354 līdz 830 nm

LED darbības princips parādīts 3. attēlā. Pusvadītāju elektriskā vadītspēja, atšķirībā no metāliem, ir saistīta ar elektronu kustību dažādos enerģētiskos stāvokļos. Viena tipa pusvadītājos (n-tipa) elektriskā laukā pārvietojas elektroni, un otra tipa pusvadītājos (p-tipa) pārvietojas “elektronu vakances” ar pozitīvu lādiņu. Fizikā šīs elektronu vakances sauc par caurumiem un elektrisko vadītspēju p-tipa pusvadītājos – par cauruma vadītspēju. Starp p- un n-tipa pusvadītājiem veidojas plāns robežslānis ar enerģētisku barjeru  $E_g$ . Šo barjeru (aizliegtās zonas platumu – angļu val. *gap*) nosaka pusvadītāja atomārā struktūra, un  $E_g$  dažādos materiālos mainās robežās no 3,5 līdz 1,5 eV ( $1 \text{ eV} = 10^{-7} \text{ J}$ , džouls). Līdzsprieguma (daži volti) izraisītā strāva gaismas diodes robežslānī noved pie elektronu un caurumu rekombinācijas ar gaismas kvanta ( $h\nu$ ) emisiju. Gaismas kvanta enerģiju nosaka barjeras  $E_g$  lielums, un pusvadītāja materiālos tas mainās robežās no 3,5 līdz 1,5 eV, kas atbilst izstarotai gaismas viļņu garumam ( $\lambda$ ) no 350 līdz 830 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$  – viena miljardā daļa metra). Emitētās gaismas intensitāte (izstaroto fotonu  $h\nu$  skaits sekundē) ir proporcionāla elektronu un caurumu rekombinācijas ātrumam [6]. Tomēr

emisijas efektivitāte samazinās pie strāvām, kas lielākas par 20 miliampēriem. Tāpēc lielākām gaismas plūsmām jāizmanto LED matricas [6]. Pirmo LED spuldžu jauda bija daži desmiti milivatu un gaismas atdeve (4. att.) – daži desmiti lūmenu uz vatu elektriskās jaudas. Mūsdienā komerciālajām LED lampām efektivitāte ir 100  $lm/W$  (2. tab.), un LED ar augstāku efektivitāti 300  $lm/W$ , kas sasniegta firmu laboratorijās [6], tiks ieviestas ražošanā pēc dažiem gadiem [8].

LED spuldze ar p- un n-tipa pusvadītājiem kļuva iespējama tikai ar augstas kvalitātes materiāliem, precīzu piemaisījuma dotāciju un plāno kārtiņu nanotehnoloģiju (5. att.). Pirmās komerciālās LED uz GaAs bāzes ar 900 nm emisiju infrasarkanā diapazonā izstrādāja elektronu koncerns *Texas Instruments* (ASV). Dažus gadus vēlāk *General Electrics* (ASV) izstrādāja LED (GaAsP) ar emisiju sarkanā diapazonā. Straujš pavērsiens šīs tehnoloģijas attīstībā notika 1993. gadā, kad japāņu fiziķu grupa uz GaN bāzes izstrādāja pirmās LED ar zilu emisiju [6].



4. attēls. Gaismas intensitātes mērvienība ( $cd$ ) ir kandela (latīņu val. *candela* – svece). Kandela definēta zaļai gaismai ( $\lambda = 555\text{ nm}$ ), pret kuru cilvēka acij ir vislielākā jutība:  $1\text{ cd} = 0,00146\text{ W/sr}$  (vati steradianā; 4a. att.). Gaismas plūsmas mērvienība ir lūmens ( $lm$ ):  $1\text{ lm} = 1\text{ cd/sr}$  (viena kandela steradianā). Gaismas avotam ar intensitāti  $1\text{ cd}$  pilnā gaismas plūsma visos virzienos ir  $4\pi$  lūmeni. Salīdzinājumam – sveces intensitāte atbilst aptuveni vienai kandelai un 100 vatu kvēlspuldze – ap simt kandelām

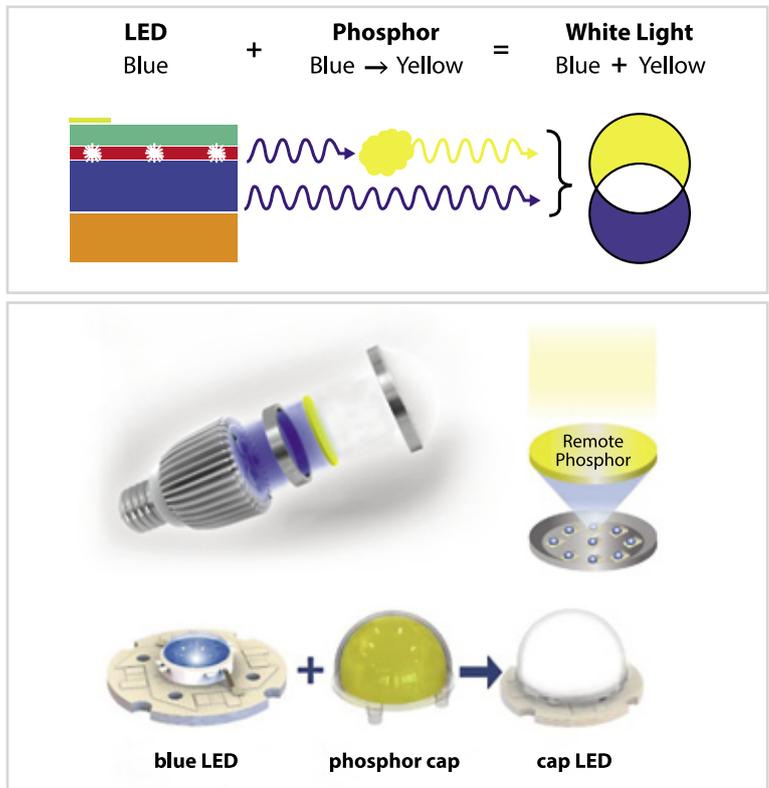
## No universitātes laboratorijas līdz komerciālai ražošanai un Nobela prēmijai

Pagājušā gadsimta beigās LED plaši izmantoja dažādos indikatoros, optiskā sakaru tehnikā un citur. Lai paplašinātu pielietojumu un radītu LED ar balto gaismu, bija nepieciešama LED ar zilu starojumu. Mūsu acs uztver elektromagnētisko starojumu ar viļņu garumiem no 380 līdz 780 nm, ko apzīmē kā redzamo gaismu. Balto gaismu var iegūt, summējot sarkano, zaļo un zilo starojumu. Tieši tāpēc zilo LED izstrāde bija svarīgs posms balto LED gaismas avotu ieviešanā. Svarīga problēma bija arī LED efektivitāte – gaismas atdeve uz vatu elektriskās jaudas.

Pagājušā gadsimta beigās japāņu fiziķi **Isamu Akasaki**, **Hiroši Amano** (abi – Nagojas Universitāte) un **Sudzi Nakamura** (*Nichia Chemical*) uz GaN bāzes izstrādāja pirmo LED ar zilu emisiju [6]. Šīs zinātnieku grupas priekšrocība bija fundamentālo pētījumu tiešā sasaiste ar industriju. Japāņu zinātnieku darbs divos gadu desmitos sekmēja apvērsumu LED pielietojumā, tostarp apgaismes tehnikā, un 2014. gadā vainagojās ar Nobela prēmiju fizikā, kas tika piešķirta “par zilo gaismu izstarojošās diodes izgudrojumu, kas ļauj veidot efektīvus un energotaupīgus baltās gaismas avotus” [7]. Reti kurš izgudrojums tik īsā laikā ir izraisījis tehnisku revolūciju un nesis autoriem pelnīto slavu! Patlaban visi trīs zinātnieki ir profesori ar aktīvu zinātnisku darbību. Sudzi Nakamura 2007. gadā saņēma ASV pavalstniecību un šobrīd ir profesors Kalifornijas Universitātē Santabarbarā.

## LED gaismas avotu priekšrocības

Profesors Sudzi Nakamura savā Nobela prēmijas lekcijā šādi raksturoja gaismas avotu attīstību: “Gaismas avotu efektivitāte ir mērojusi tūkstošiem gadu ilgu ceļu – no eļļas lampām ( $0,1\text{ lm/W}$ ) 15 000 gadus pr. Kr. kvēlspuldzēm ( $16\text{ lm/W}$ ) un luminiscences spuldzēm ( $70\text{ lm/W}$ ) divdesmitajā gadsimtā līdz baltām LED



5. attēls. Pirmo LED ar zilu emisiju 1993. gadā izstrādāja japāņu fiziķi Isamu Akasaki, Hiroši Amano (abi – Nagojas Universitāte) un Sudzi Nakamura (*Nichia Chemicals Company*). GaN gaismas diode (*Blue LED*) izstaro zilo gaismu un ierosina luminoforu (*Phosphor*) ar dzeltenu luminiscenci (*Blue → Yellow*). Rezultātā rodas balta gaisma (*White Light*). Apakšā shematiski attēlota LED lampa [6]

Avots: Tesla Crystals

2. tabula. Eksploataācijas izdevumi kvēlspuldzēm un baltām LED lampām [8]

Parametrs	Kvēlspuldze	LED Eco Smart clear	LED Phillips*	LED Cree	LED V-TAC
Cena, \$	0,41	3,29	2,03	3,50	1,79
Jauda, W	60	6,5	8,5	9,5	9
Gaismas plūsma, lm	860	800	800	815	806
Atdeve, lm/W	14,3	123,1	94,1	85,8	89,6
Eksploataācijas ilgums stundās, h	1000	15 000	10 000	25 000	20 000
Elektroenerģijas izmaksas 20 gados (6 stundas dienā); 1 kWh izmaksā 12,5 centus	329	36	47	52	49

\* Cenas Eiropā ir salīdzināmas: Phillips LED E27A607W Vācijā maksā 2,38 €

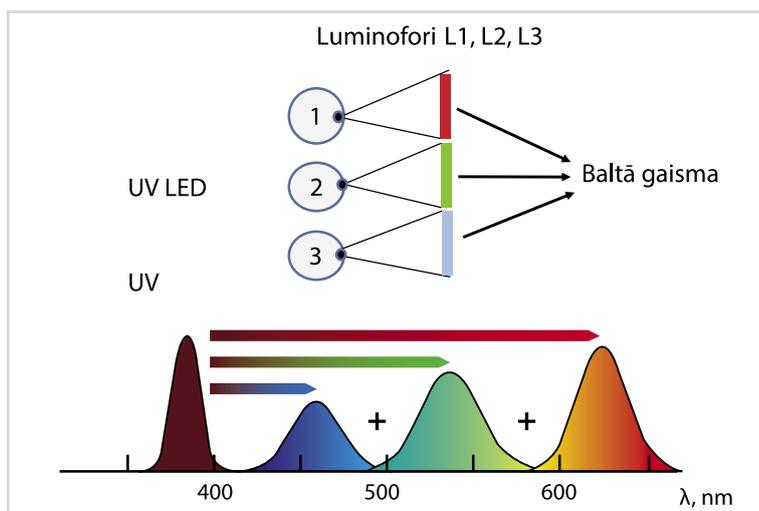
lampām (300 lm/W) divdesmit pirmajā gadsimtā” [6].

Pirmajās LED lampās izmantoja GaN pusvadītāju ar zilās gaismas emisiju (maksimums pie 450 nm) kopā ar luminoforu  $Y_3A_{15}O_{12}:Ce$  (angļu val. – *phosphor*), kas zilās gaismas iespaidā izstaro dzeltenu luminiscenci (5. att.). Šo paņēmieni var izmantot tikai ar zilām vai ultravioletām gaismas diodēm. Pēc kvantu fizikas likumiem luminiscenci pusvadītāju vai dielektriskos materiālos var ierosināt tikai ar gaismas kvantiem, kuru enerģija ir lielāka par emitēto kvantu. Tas izskaidrojams ar to, ka luminiscences procesā daļa no ierosinātā kvanta enerģijas ( $h\nu_{ieros.}$ ) tiek pārvērsta režģu svārstībās (siltumā) un izstarotā kvanta enerģija ( $h\nu_{emit.}$ ) ir mazāka ( $h\nu_{emit.} < h\nu_{ieros.}$  – atbilstoši garākam izstarotam viļņu garumam,  $\lambda_{emit.} > \lambda_{ieros.}$ ).

LED lampas ar ultravioleto starojumu tika izstrādātas uz bora nitrīda BN (ar 215 nm emisiju), alumīnija nitrīda AlN (ar 210 nm emisiju) un AlGaInN (ar emisiju ap 210 nm) bāzes. Šie izstrādājumi pavēra iespēju ar ultravioletām gaismas diodēm izveidot baltās LED lampas ar trim dažādiem luminoforiem (6. att.).

LED lampas pielietojumam bija nepieciešama jauna tehnoloģija, tai skaitā arī līdzstrāvas tehnika, kā sprieguma avots. Pēc pirmo zilo LED izstrādes tam bija nepieciešami vairāki gadi [8]. Jau 20. gadsimta beigās gaismas diodes plaši izmantoja optoelektronikā, displejos un signalizācijā. Pirmās komerciālās baltās LED lampas apgaismojumam parādījās 21. gadsimta sākumā, un šodien šie efektīvie un ekonomiskie gaismas avoti dominē pasaules tirgū (2. tab.) [8].

Arēji LED apgaismes lampas neatšķiras no kvēlspuldzēm, tām ir arī līdzīgi cokoli. Turpretī tehniskā uzbūve LED spuldzēm būtiski atšķiras. Korpusā atrodas neatņemama LED lampu sastāvdaļa – līdzstrāvas barošanas modulis, kas ir integrēts lampas tehniskajā sistēmā. Lampas konstrukciju veido izolatora pamats (angļu val. – *substrate*), uz kura ir novietotas matricas ar pusvadītāju kārtiņām un speciālām optiskām aizsargkārtiņām, kas nodrošina maksimālo gaismas atdevi. Lampas balonā ir arī luminoforu slāņi baltās gaismas ieguvei (sk. 5. att. apakšā). LED lampa izmaksā dārgāk nekā kvēlspuldze (2. tab.), tomēr, pateicoties lielajai gaismas atdevei (efektivitāte, lm/W) un daudz ilgākam eksploataācijas periodam (20 reizes un vairāk!), šīs gaismas diodes ir salīdzinoši ekonomiskāki gaismas avoti. Tiek prognozēts, ka nākamajā desmitgadē LED lampu tirgus pieaugs vairāk nekā divpadsmit reizes (no \$2 mljrd. ASV dolāru 2014. gadā līdz \$25 mljrd. 2023. gadā [8]) un LED spuldzēm būs domnējošā loma apgaismes tehnikā [9]. **ERP**



6. attēls. Attēlā dota principiāla shēma, kurā trīs LED ar ultravioleto starojumu un trim dažādiem luminoforiem (L1, L2, L3) dod baltu gaismu

#### Literatūra

- [1] David Bruno, Cave Art, Thames & Hudson (World of Art), 2017
- [2] Paul Israel, Edison: A Life of Invention, John Wiley & Sons, 1998
- [3] Round H.J., A note on carborundum, Electrical World, 49, 309, 1907
- [4] Lossev O.V., CII. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals, Philosophical Magazine, 6, 1024 – 1044, 1928
- [5] Zheludev N., The life and times of LED – a 100-years history, Nature Photonics, 1 (4), 189 – 192, 2007
- [6] Nakamura S., Nobel Lecture: Background story of the invention of efficient blue InGaN light emitting diodes, Reviews of Modern Physics, 87. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.1139
- [7] Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura, The Nobel Prize in Physics 2014, Press Release 7 October 2014
- [8] Bergesen J.D. et al., Potential long-term im global enviromental implications on efficient light-source technoloigoies, Journal of Industrial Ecology, 20 (2), 263 – 275, 2015 DOI:10.1111/jiec.12342
- [9] How Energy-Efficient Light Bulbs Compare with Traditional Incandescent, energy.gov. Retrieved 4 February 2018